

Diseño de salidas de altas prestaciones

Fernando Pedraza Majarrez, ICCP, Ministerio de Fomento; y Alfredo García García, Catedrático del Departamento de Transportes de la Universidad Politécnica de Valencia. Artículo revisado por el Comité de Carreteras Interurbanas y Transporte Integrado Interurbano de la ATC.

Resumen

Las crecientes necesidades de nuestro sistema viario requieren ampliar el concepto de salida que venimos utilizando. Cada vez es más fre-

cuenta la aparición de ineficacias para resolver demandas de tráfico elevadas en muchos carriles de cambio de velocidad del entorno de grandes ciudades.

Es necesario madurar soluciones que permitan resolver satisfactoriamente las salidas de altas prestaciones, sin llegar a diseñar bifurcaciones de calzadas, con condiciones de funcionamiento alejadas del flujo libre en una proporción importante del tiempo de servicio.

Se proponen diversas alternativas para el diseño de salidas de altas prestaciones. Para ramales de salida de un solo carril se propone la implantación de un carril adicional previo a la salida, en una longitud suficiente para que el flujo de vehículos alcance la estabilidad, y se reduzca la densidad. También se propone el empleo de ramales de salida con dos carriles, mediante la superposición de diversos tipos de carriles, con

funcionalidades diferentes: carriles de cambio de velocidad paralelos; carriles nuevos en cuña; carril bífido adosado al carril perdido en el ramal; y carril bífido, pero segregado del carril perdido.

La salida o entrada de una vía con cierto nivel de demanda de tráfico no es un simple problema dinámico del vehículo. Además, hay que considerar de forma explícita la seguridad inherente a las diferentes configuraciones. Hay que establecer una solución de compromiso entre el incremento de la funcionalidad de la salida y la optimización de su seguridad vial, ya que se ha demostrado que, estableciendo carriles de deceleración más largos o, lo que es lo mismo, carriles auxiliares funcionales o carriles perdidos en la salida, se incrementa la siniestralidad asociada a una mala percepción del diseño.

Otra parte importante del diseño de las salidas de altas prestaciones

está relacionada con la forma más adecuada de señalizarlas, tanto horizontal, como verticalmente. Las normativas actuales de señalización no contemplan específicamente este tipo de salidas, por lo que será necesario su estudio para llegar a proponer las determinaciones correspondientes que garanticen una adecuada funcionalidad y seguridad a los usuarios.

Palabras clave: autopista, ramal, carril de deceleración, diseño geométrico, capacidad, seguridad vial.

1. Introducción

La Norma 3.1-IC "Trazado" (Dirección General de Carreteras, 1999) establece el carril de cambio de velocidad como elemento fundamental de diseño destinado a facilitar la entrada o salida de los vehículos en nuestras carreteras principales. Estos carriles se clasifican en dos tipos: paralelos y directos, limitando los di-



rectos al caso exclusivo de las salidas y con carácter excepcional.

Conforme a su definición⁽¹⁾, su funcionalidad se basa exclusivamente en proporcionar una acomodación de velocidades entre la carretera y su acceso dentro de la conexión. Este criterio va ligado al objetivo de facilitar una maniobra segura y, por tanto, resulta evidente que la introducción de estos elementos en el diseño ha supuesto una indudable mejora del nivel de seguridad de nuestro sistema viario.

Bajo este planteamiento, el modelo de análisis adoptado por la Norma, del que se deducen las longitudes de los carriles de cambio de velocidad, es un modelo dinámico, que atiende exclusivamente a las prestaciones que puede desarrollar un vehículo patrón o de diseño. La longitud de los carriles se obtiene de la resolución de la ecuación unidimensional de un movimiento acelerado/decelerado entre dos secciones de velocidades dadas para una inclinación media constante de la rasante.

En este artículo se introducen otros criterios para el diseño de una conexión: la eficacia de su funcionamiento desde el punto de vista de los tráfico a que debe dar servicio y la consideración de la seguridad, que tienen consecuencias reseñables para la elección de:

- La longitud de los carriles de cambio de velocidad.
- El número de carriles del ramal de conexión.
- La tipología de la conexión.
- El balance entre el número de carriles de la vía principal, antes y después de la conexión, y el número de carriles del ramal de conexión.

En una primera fase de aproximación al problema, este artículo se centra en el estudio de las salidas, aunque en esencia el planteamiento pudiera parecer conceptualmente simétrico desde el punto de vista dinámico; pero no hay que olvidar que las entradas suponen un fenómeno de operación del tráfico muy diferente del que se produce en las salidas, ya que los vehículos se insertan en la corriente

	Carril	Longitud (m)	Cuña (m)	% vehículos que aceleran
1	CV35 – 7, configuración 1	395	100	35,7
2	CV35 – 7, configuración 2	285	100	33,3
3	CV35 – 7, configuración 3	187	83	0
4	CV35 – 7, configuración 4	107	70	0
5	A3 – 351	80	34	2
6	A7 – 484	217	100	43
7	V21 – 14,3 a	215	100	32
8	V21 – 14,3 b	184	100	11
9	V21 – 5,1	187	83	19
10	V21 – 8,95	209	83	2
11	V30 – 4,9	88	70	19
12	V31 – 6,8	137	70	21
13	V31 – 8,5	100	70	3
14	V31 – 9,8	229	100	34

Tabla 1. Porcentaje de vehículos que aceleran en los carriles de deceleración observados.

principal cuando sus conductores evalúan y aceptan un hueco suficiente para ello, llevando a cabo un cierto proceso de aceleración, pero que difícilmente se puede considerar uniforme.

2. Los modelos dinámicos de diseño del carril de cambio de velocidad

Los modelos empleados en el estudio y predicción de las prestaciones de un vehículo se caracterizan por ser bidimensionales, hecho que se consigue en esencia despreciando el efecto sobre el vehículo de las solicitaciones transversales a él. Esta hipótesis implica básicamente: una trayectoria recta o en curva de gran radio; calzadas sin pendiente transversal; pavimentos regulares; ausencia de viento lateral; y falta de asimetrías en el vehículo.

Pero además es posible simplificar aún más el problema y llegar a un modelo longitudinal si:

- Se desprecian los efectos de sustentación y cabeceo debidos al viento, contemplándose exclusivamente la resistencia al avance del vehículo.
- El vehículo se considera un sólido rígido indeformable, situación que ignora la presencia del sistema de suspensión, y conduce a despreciar los efectos dinámicos de los movimientos de balanceo, cabeceo y guiñada del vehículo.

– No se considera la mecánica profunda de la frenada o de la tracción; reparto de carga entre ejes, eficacia del frenado, inestabilidades, etc.

– Al usuario se le supone un pleno dominio del vehículo, de forma que puede aprovechar al máximo sus prestaciones, tanto en la maniobra de frenado como en la tracción.

– No se tiene en cuenta la variabilidad en el comportamiento de los conductores.

Simplificado el problema como se indica, es posible llegar a modelos analíticos de abordable resolución, que permiten deducir las longitudes de los carriles de cambio de velocidad para las prestaciones del vehículo elegido. Para el caso concreto de los carriles de cambio de velocidad, los modelos dinámicos de diseño adoptan un vehículo patrón del tipo turismo.

Este planteamiento clásico es susceptible de crítica en los sentidos siguientes:

– Por un lado, la observación del comportamiento de los usuarios induce a pensar que la distribución de sus aceleraciones/deceleraciones es más compleja que las consideradas por los sencillos modelos analíticos.

Son los usuarios en último extre-

(1) Carril destinado a incrementar o reducir la velocidad, desde la de los elementos de un acceso a la de la calzada principal de la carretera, o viceversa.

mo los que deciden qué aceleraciones o deceleraciones son aceptables y cómo se distribuyen a lo largo de los carriles de cambio de velocidad, decidiendo incluso no frenar de forma mecánica y dejar que las resistencias al avance del vehículo reduzcan su velocidad inicialmente, para terminar frenando.

- Por otro lado, la falta de suficientes estudios de campo sobre las hipótesis que configuran los modelos analíticos de predicción de prestaciones nos impiden perfeccionarlo.

Pese a sus limitaciones, atender a las prestaciones de los vehículos maniobrando en una salida o entrada es la aproximación comúnmente adoptada por las distintas normas de diseño. No obstante, se aprecian diferencias en cuanto a las secciones entre las que se evalúa la aceleración/deceleración, permitiéndose que parte del espacio recorrido en la maniobra se realice en el ramal correspondiente, con lo que varían notablemente los diseños resultantes. Además, hay algunas normativas que asumen una disminución fija de la velocidad dentro de la calzada principal, antes del ingreso del vehículo en el carril de deceleración, independientemente de la longitud que tenga dicho carril.

3. El comportamiento observado de los conductores en las maniobras de salida

En una investigación⁽²⁾ realizada en 10 carriles de deceleración localizados en el área metropolitana de Valencia, junto con el carril de deceleración ubicado en el p.k. 7 de la autovía CV-35, donde se instalaron con cinta adhesiva 6 configuraciones experimentales de señalización horizontal, cuyo objetivo era evaluar el comportamiento de los conductores en función de la longitud del carril, se ha evidenciado la necesidad de tener en cuenta otros elementos en el diseño de los carriles de deceleración, como son la intensidad del tráfico y la seguridad en las maniobras, entre otros (García y Romero, 2006).

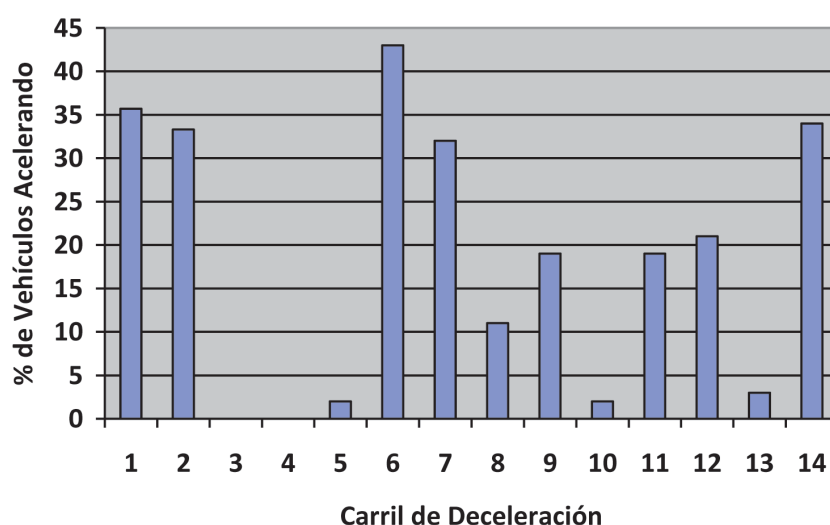


Figura 1. Porcentaje de vehículos que aceleran en los carriles de deceleración observados.

Después de evaluar los resultados obtenidos, puede concluirse que el comportamiento de los conductores dista mucho de los supuestos de deceleración uniforme que suelen adoptarse en los modelos cinemáticos y dinámicos. En primer lugar, los conductores, independientemente de la longitud del carril, deceleran por retención del motor en la vía principal para realizar la maniobra de cambio de carril; y luego realizan su maniobra de frenado.

Sólo si el carril de deceleración es insuficiente, la maniobra de frenado se inicia cuando el vehículo se encuentra aún en la vía principal. Asimismo, si el carril es demasiado largo, entre la maniobra de cambio de carril y la maniobra de frenado incluso se pueden observar aceleraciones. Se evaluó el porcentaje de los vehículos que aceleraban en el carril de deceleración, como una medida contraria a la funcionalidad esperada del carril. Los resultados se recopilan en la tabla 1.

Como se puede observar en la tabla 1 y en la figura 1, si el carril de deceleración es largo, aparece un porcentaje alto de vehículos que aceleran dentro de él. A partir de unos 200 m de longitud, un tercio de los vehículos acelera hasta encontrarse a una distancia suficiente del inicio del ramal de salida, y empieza a frenar para acomodar finalmente su velocidad. Este fenómeno constatado experimentalmente demuestra clara-

mente que el modelo dinámico empleado en España y otros muchos países no se ajusta a la realidad de las maniobras de salida, especialmente para longitudes largas.

En los carriles experimentales se ha encontrado una tasa de deceleración media por retención con el motor de $-0,76 \text{ m/s}^2$, más alta que la encontrada por Polus y otros (1985), pero más cercana al valor recomendado por la AASHTO (2004). Se encontró una duración media de la maniobra subconsciente de deceleración de 6,9 s, que es un valor muy superior al de la AASHTO (2004), que es de 3,5 s.

En todos los carriles observados se ha ratificado una disminución fija de velocidad en la calzada principal, independiente de la longitud del carril, que oscila entre 15 y 20 km/h.

En cuanto a la deceleración por aplicación de los frenos, se halló en los carriles experimentales un valor medio de $-1,74 \text{ m/s}^2$, similar a los obtenidos por Colona (1997) y por Canale (1998).

Los resultados experimentales correspondientes a todas las localizaciones señalan también que el percentil 85 de la tasa de deceleración máxima frenando es de $-3,34 \text{ m/s}^2$, que es muy cercano al valor de de-

(2) Esta investigación ha sido posible gracias a la financiación de la Dirección General de Obras Públicas de la Consejería de Infraestructuras y Transporte de la Generalidad Valenciana.

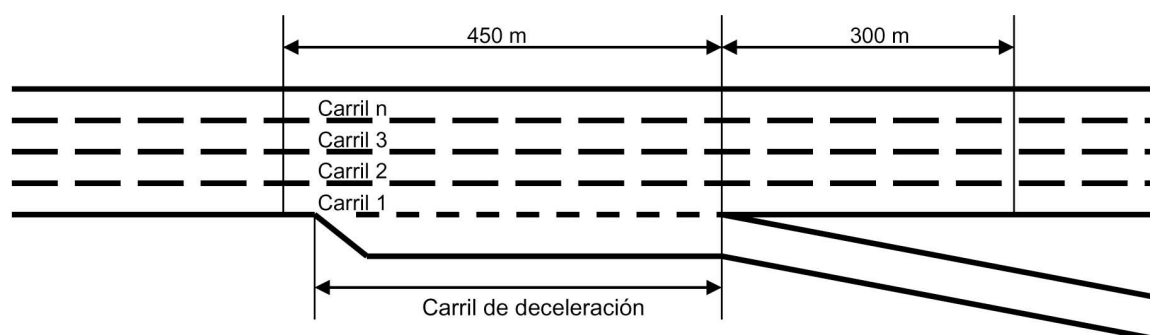


Figura 2. Configuración de salida tipo 1.

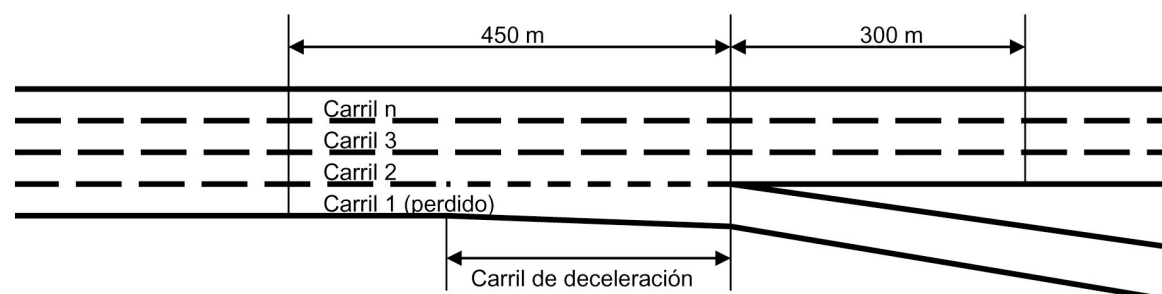


Figura 3. Configuración de salida tipo 2.

celeración confortable. Para el conjunto de las maniobras de frenada se han determinado los siguientes valores de la tasa de deceleración: un valor medio de $-1,65 \text{ m/s}^2$; un valor del percentil 85 de $-2,39 \text{ m/s}^2$; y un valor del percentil 15 de $-1,18 \text{ m/s}^2$. Estos valores son claramente inferiores al adoptado en la Norma 3.1-IC "Trazado", de $-2,00 \text{ m/s}^2$.

No se ha encontrado una variación apreciable entre los valores de deceleración en función de la longitud del carril de deceleración, lo que nos muestra que los conductores realizan la maniobra de deceleración sin tener en cuenta la longitud del carril, sino dependiendo de su apreciación de la distancia a la salida.

El comportamiento encontrado evidencia que el cálculo dinámico de la longitud de los carriles de deceleración debe hacerse por tramos: en primer lugar, un tramo para el cambio de carril abandonando la vía principal; luego, el tramo de frenada.

4. La seguridad vial en las salidas

En la investigación descrita se observó en los carriles más largos un incremento de la conflictividad, debi-

do a una mayor exposición a conflictos laterales y, en algunos casos, a una mayor frecuencia de maniobras peligrosas; además, se encontró una mayor conflictividad en las localizaciones con carriles de deceleración de menor longitud, debido a que los vehículos deceleraban en la vía principal aumentando la exposición a un conflicto de alcance. Por tanto, se ha podido concluir que la longitud óptima de los carriles de deceleración es una longitud intermedia, fruto de una solución de compromiso entre las dos situaciones descritas, con el fin de minimizar los efectos sobre la vía principal y los conflictos laterales.

Por otra parte, se ha observado que la conflictividad aumenta con intensidades intermedias de tráfico, ya que en esta situación los vehículos disponen de un alto nivel de movilidad y un bajo riesgo percibido, lo que facilita la ocurrencia de maniobras peligrosas. En contraposición, cuando la intensidad del tráfico es baja, hay menor probabilidad de exposición a conflictos, al ser también baja la densidad; igualmente la conflictividad se reduce cuando la intensidad del tráfico es alta, ya que los conductores tienen una mayor percepción de riesgo para realizar sus maniobras de

cambio de carril.

En el pasado Congreso anual del TRB se presentó una investigación que tenía como principal objetivo comprobar la importancia que la configuración y el número de carriles de las salidas de altas prestaciones en autopistas tienen sobre la seguridad (Chen y otros, 2008). Hasta el momento los estudios realizados nunca habían tenido en cuenta la importancia que podría tener dicho aspecto en la seguridad; por tanto, con esta investigación se trató de verificar cuál sería la configuración óptima de los carriles de salida para que la siniestralidad fuera mínima.

En el estudio se plantearon cuatro tipologías de salidas sobre las que se llevó a cabo el análisis. La salida del tipo 1 se trataba de un único carril nuevo de salida, con la configuración habitual de cierta longitud para la deceleración y una cuña inicial de transición (figura 2). La salida del tipo 2 consistía en un carril de salida perdido, es decir, que disminuía el número de carriles en la calzada principal, pasando a ser el situado más a la derecha el carril del ramal de salida (figura 3). La salida del tipo 3 se correspondía con un ramal de salida de dos carriles, al que se llegaba con un



carril derecho perdido y un carril bífido que permitía optar por la continuidad en la calzada principal o la salida hacia el carril 2 del ramal (figura 4).

La salida del tipo 4 englobaba también un ramal de salida de dos carriles; pero en este caso se perdía un carril de la calzada principal y se ganaba uno nuevo por la derecha a lo largo de la salida (figura 5).

Los estudios realizados hasta el momento sobre el funcionamiento de las salidas en autopistas se habían

centrado fundamentalmente en un aspecto, que era la longitud del carril de deceleración; pero nunca se había tenido en cuenta la influencia que podía tener el número de carriles del ramal de salida en la siniestralidad.

En la investigación citada se han utilizado datos de accidentes de 424 tramos de autopista en Florida. Cada tramo de autopista queda definido por dos secciones: la primera a 450 m antes de la salida, y la segunda a 300 m después de la salida;

en total una longitud para cada tramo de 750 m. Dentro de los datos de accidentes se ha hecho la distinción entre accidentes sólo con daños materiales, accidentes con víctimas y accidentes con víctimas mortales.

Además, hay que tener en cuenta que el estudio se centra en los efectos sobre la seguridad de salidas por la derecha; no se tiene en cuenta en este caso la posibilidad de salidas por la izquierda. Los datos de accidentes se corresponden con 3 años, de 2004 a 2006.

Sobre la base de datos de accidentes recogidos, se ha llevado a cabo un análisis estadístico para evaluar la influencia sobre la seguridad de las distintas tipologías de salida. En las comparaciones transversales se han analizado las siguientes variables: número anual de accidentes, tasa de accidentes (medido en número anual de accidentes por millón de vehículos · milla recorrida), y la gravedad de los accidentes.

En este caso se ha tomado como modelo estadístico el de Poisson, el más adecuado para modelar el fenómeno que se estudia: la variable “número anual de accidentes” es aleatoria y discreta, frente a lo que sería el

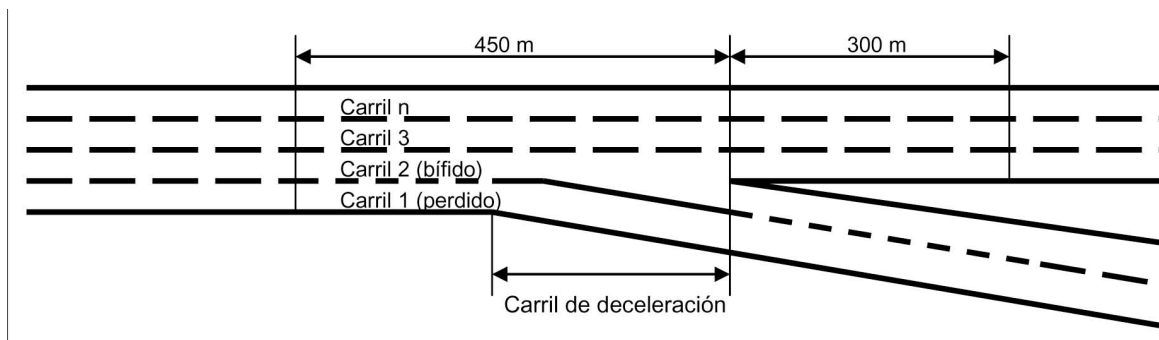


Figura 4. Configuración de salida tipo 3.



Figura 5. Configuración de salida tipo 4.

modelo clásico de regresión lineal donde la variable es continua y de varianza constante. También puede ser de aplicación el modelo binomial, donde se asume que la variable “número anual de accidentes” se distribuye según una función Poisson-Gamma.

La salida del tipo 1 es la que tiene mejor funcionamiento desde el punto de vista de la frecuencia y tasa de accidentes, es decir, presenta el menor número de accidentes. La salida del tipo 2 es la que presenta una mayor frecuencia y tasa de accidentes y, por tanto, un mayor número de accidentes. La salida del tipo 3 presenta unos valores bajos de frecuencia y tasa de accidentes frente a la salida del tipo 4, la cual presenta unos valores un tanto mayores, pero que no superan en ningún caso a los del tipo 2.

Desde el punto de vista de la gravedad de los accidentes se puede decir que los porcentajes de accidentes mortales y accidentes con víctimas son similares para los 4 tipos; siendo ligeramente superior en el tipo 2 y un poco inferior en el tipo 1 respecto del resto.

Según los resultados del análisis realizado para las distintas tipologías de salida, se ha visto que la más segura es la del tipo 1. Si se comparan las 2 tipologías de salida que disponen de un solo carril (tipos 1 y 2) se ve cómo, al pasar de la tipología 1 a la 2, se incrementa el número de accidentes en un 12,8%. Si se comparan las dos tipologías de salida que disponen de dos carriles (tipos 3 y 4) se ve cómo la tipología 3 es más segura que la 4, con un número de accidentes un 11,7% superior en el tipo 4.

Por tanto, se concluye que, para un único carril de salida, la más segura es la tipología 1; y que, para dos carriles de salida, la tipología más segura es la del tipo 3. Esto se debe a que tanto en la tipología 2 como en la 4 no se da la posibilidad de continuar por la autopista; y, por tanto, cuando los conductores que no quieren desviarse se dan cuenta que realmente han entrado en un carril de salida intentan hacer maniobras para incorpo-



rarse de nuevo al carril que les permita continuar por la vía principal, efectuando una maniobra de cambio de carril apresurada, siempre conflictiva y que, en muchos casos, puede tener un riesgo importante de accidente.

Hay que resaltar que en la investigación presentada todas las salidas con carriles perdidos se señalizan como está establecido en Estados Unidos, es decir, con una advertencia específica añadida al cartel principal de orientación y de color amarillo. Si, a pesar de ello, se ha demostrado una peligrosidad mayor, se puede suponer que en nuestro país, donde la norma de señalización vertical no establece este tipo de señalización complementaria de advertencia, la peligrosidad será aun mayor.

En la investigación anterior desarrollada por García y Romero (2006) se ha podido comprobar que el porcentaje de maniobras de reincorporación aumenta con la longitud del carril de deceleración (figura 6), lo cual está en consonancia con los resultados demostrados entre los tipos 1 y 2.

5. El criterio de la eficacia de funcionamiento

El planteamiento exclusivamente dinámico oculta una parte del fenómeno, quizás de mayor calado. Buscar la acomodación de velocidades

entre los elementos de una conexión tiene sentido si no se consideran las interacciones entre los vehículos que circulan por ella: para lo que se requiere que el tronco y su acceso se encuentren funcionando con bajas intensidades, es decir, con flujo libre.

En las autopistas las conexiones deben diseñarse para que las perturbaciones que se puedan provocar⁽³⁾ al tronco por la salida o entrada de vehículos sean las menores posibles.

La vigente versión del *Highway Capacity Manual* (TRB, 2000) define la densidad como medida principal de eficiencia del funcionamiento de las convergencias y divergencias. Para densidades superiores a 22 (veh. lig./km)/carril se considera que la demanda rebasa la capacidad (nivel de servicio F), y se sitúa más allá del umbral de eficacia de los elementos que configuran la conexión.

En dicho Manual se estima la densidad en las zonas de influencia de las convergencias y divergencias mediante regresiones lineales múltiples. En estos modelos se supone una relación estadística entre la variable dependiente (densidad) y otras variables independientes, consideradas explicativas, como la intensidad de tráfico de los carriles cercanos al acce-

⁽³⁾ Reducción de la velocidad de recorrido, del nivel de servicio y de la propia capacidad.

Reincorporaciones %

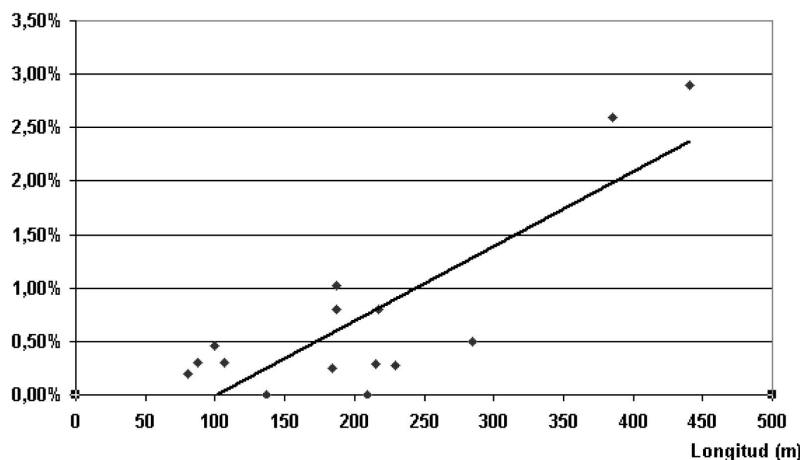


Figura 6. Porcentaje de maniobras de reincorporación en función de la longitud del carril de deceleración.

so, la intensidad de los ramales o la longitud de los carriles de cambio de velocidad.

Para el caso de las confluencias, se considera la dependencia de la intensidad del ramal (v_R), de la intensidad de los dos carriles contiguos a la entrada (v_{12}) y de la longitud del carril de aceleración (L_A), mediante la ecuación 1.

$$D_R = 3,4027 + 0,00456V_R + 0,00485V_{12} - 0,01278L_A \quad (1)$$

El coeficiente de determinación de esta regresión es 0,88, con un error estándar de estimación de la media de 2,68 (veh. lig./km)/carril.

Para las divergencias, la densidad se estima exclusivamente partiendo de la intensidad de los dos carriles cercanos a la salida (v_{12}) y de la longitud del carril de deceleración (L_D), a través de la ecuación 2.

$$D_R = 2,6426 + 0,005345V_{12} - 0,0183L_D \quad (2)$$

El coeficiente de determinación de esta regresión es 0,93, y el error es-

tándar de 1,75 (veh. lig./km)/carril.

Es razonable pensar que en las zonas donde la interacción entre vehículos no pueda ser despreciada, las conexiones deben disponer de unos carriles de cambio de velocidad de una longitud tal que permita un funcionamiento satisfactorio de las mismas. En este caso, aparece otro criterio de diseño más determinante incluso que el relacionado con las prestaciones operativas de los vehículos, que no podrán desarrollarse al estar limitadas por las condiciones ligadas a intensidades de tráfico distintas de las de flujo libre.

Cuando se encuentran intensidades que no permiten suponer a los vehículos aislados, interactuando sus conductores sólo con la infraestructura, aparecen en las convergencias la maniobra de inserción en la corriente principal⁽⁴⁾ y, en las divergencias, la acumulación previa a la salida, que perturban las condiciones funcionales del tronco.

5.1. El funcionamiento de los carriles de cambio de velocidad fuera de flujo libre

Supongamos la situación muy común en nuestra red viaria: una salida con un carril de deceleración en una autovía o autopista de cuatro carriles, dos por cada sentido. Asumiremos las siguientes hipótesis:

- La capacidad de los carriles del tronco para una velocidad libre de 120 km/h se estima en 4800 veh. lig./h⁽⁵⁾ fuera de la zona de influencia de la divergencia, bajando a 4400 veg. lig./h en ella.

- La densidad límite para no alcanzar un nivel de servicio F en la divergencia se estima en 22 (veh. lig./km)/carril (valor idéntico para las convergencias).

Resulta un ejercicio interesante aplicar la ecuación que predice la densidad en divergencias o salidas (ecuación 2) a las longitudes de los carriles de cambio de velocidad contenidos en la tabla 7.6 de la Norma 3.1-IC "Trazado" (Dirección General de Carreteras, 1999), para deducir las intensidades de tráfico del tronco. Los resultados se reflejan en la tabla 2, en la que se han separado los valores de la intensidad de tráfico que superan la capacidad del tronco (4800 veh.lig./h) y los que suponen una reducción de más del 10% de esa capacidad. Se destacan también los valores que superan la capacidad de la zona de in-

⁽⁴⁾ Selección y aceptación del hueco adecuado.

⁽⁵⁾ Con densidades correspondientes de 28 (veh. lig./km)/carril.

INCLINACIÓN DE LA RASANTE (%)

Vdf (km/h)	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
0	5082	4985	4899	4826	4761	4699	4647	4599	4554	4516	4478	4447	4416
10	5072	4975	4892	4816	4750	4692	4640	4592	4550	4509	4474	4440	4409
20	5044	4947	4864	4792	4730	4671	4619	4571	4529	4491	4457	4422	4395
30	4992	4902	4823	4754	4692	4633	4585	4540	4498	4460	4426	4395	4367
40	4923	4837	4761	4695	4637	4585	4536	4495	4454	4419	4388	4357	4329
50	4833	4754	4685	4623	4567	4519	4474	4433	4398	4367	4336	4308	4281
60	4726	4654	4588	4533	4481	4440	4398	4364	4329	4298	4274	4246	4226

Tabla 2. Intensidad de tráfico en el tronco de autopistas de dos carriles para densidades máximas, según las longitudes de los carriles de deceleración de la Instrucción de Trazado ($V_{d0} = 120$ km/h)

fluencia de la divergencia (4400 veh.lig./h).

Obsérvese que la intensidad se expresa en vehículos ligeros, con lo que suponemos que el flujo de vehículos está compuesto exclusivamente por éstos. En el caso de haber vehículos pesados, las capacidades reales serían inferiores a los valores de cálculo, tanto más cuanto mayor fuera el porcentaje de vehículos pesados.

Antes de comentar algunas conclusiones, es necesario matizar varios aspectos de los resultados obtenidos:

- Como cualquier aplicación que se hace del HCM2000 fuera de Estados Unidos, hay que tener presente que los modelos han sido deducidos para vehículos, usuarios e infraestructuras distintas de las españolas. La transferencia de modelos necesitaría como paso previo su particularización a nuestras condiciones operativas.

- La forma de medir las longitudes de los carriles es distinta en nuestra normativa. Nuestra norma define la longitud de los carriles de cambio de velocidad entre sus secciones características, y el HCM2000 directamente entre los vértices de inicio y fin, incluyendo completamente la cuña de salida y excluyendo parte de la nariz (hasta la sección característica de 1 m). Salvo que tuviera sentido la realización de cálculos de mayor precisión, supondremos que el exceso y el defecto aproximadamente se compensan.

- Velocidades libres de 120 km/h son bajas respecto de las condiciones de movilidad que proporcionan las autopistas o autovías de reciente construcción en nuestro país, siempre que no tengan condicionantes específicos. La existencia de una velocidad límite genérica coincidente con los 120 km/h no debería posibilitar para la mayoría de los usuarios unas velocidades libres de recorrido muy superiores a ese valor. En todo caso, este efecto supondría un valor de la capacidad del tronco ligeramente mayor, el cual estimaremos que se compensa con una menor reducción de la capacidad en

la zona de influencia de la divergencia respecto de las condiciones del HCM2000.

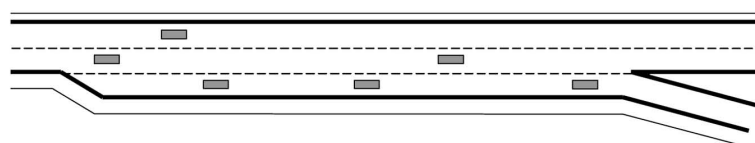
- Se asume que el ramal de salida, o la intersección con la que conecta posteriormente, no tienen problemas de capacidad. Si esta condición no se verifica, hay que empezar por resolverlos.

- El aspecto cuestionable más importante es que, desde un punto de vista estrictamente científico, los modelos de regresión no pueden aplicarse en el sentido que se ha co-

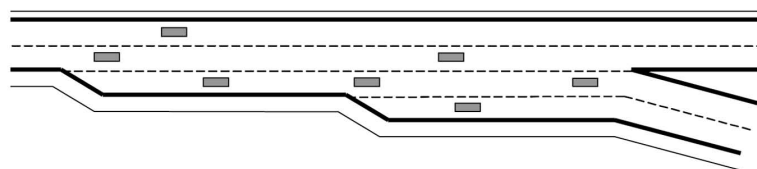
lor inferior se ha determinado para una reducción de capacidad de un 10%, que proporciona una longitud de aproximadamente 195 m. Si sólo se admitiera una reducción de un 5%, la longitud mínima sería de 265 m.

6. Diseño de salidas de altas prestaciones

Entenderemos por vías de altas prestaciones las que proporcionan en el tiempo una alta capacidad y una elevada movilidad; así, no sólo es ne-



SALIDA CON PÉRDIDA DE CARRIL



SALIDA DE DOS CARRILES PARALELOS SUPERPUESTOS

Figura 7. Diseño de salidas de altas prestaciones.

mentado. La estimación de la intensidad en los carriles cercanos a la salida requiere un modelo de regresión específico.

No obstante, y a pesar de la crítica anterior, los resultados apuntan a un hecho conceptual digno de estudio: para el caso de divergencias en condiciones alejadas del flujo libre, la longitud de los carriles de deceleración se encuentra acotada por:

- Una longitud máxima, de forma que valores mayores no resultan aprovechados, dado que la elevada intensidad de tráfico que teóricamente permitirían se ve limitada por la capacidad de la zona de influencia o incluso del propio tronco⁽⁶⁾. En el ejemplo calculado este valor superior resulta de aproximadamente 335 m.

- Una longitud mínima, puesto que longitudes reducidas representan una restricción innecesaria de la capacidad. En el ejemplo calculado este va-

cesario contemplar su funcionamiento en flujo libre, sino que también se debe tener presente su funcionamiento fuera del mismo, que aparecerá de una forma más recurrente.

Todo lo comentado sobre los carriles de cambio de velocidad representa una limitación intrínseca de los mismos como elementos de diseño destinados a satisfacer las altas y frecuentes demandas de tráfico de una conexión de altas prestaciones.

En conexiones de altas prestaciones se requerirán soluciones técnicas distintas, que pueden pasar por (figura 7):

- La implantación de un carril adicional previo a la salida y con sufi-

⁽⁶⁾ Aunque como veremos inmediatamente, si se busca alcanzar densidades menores en la conexión, sí pueden ser necesarios carriles de cambio de velocidad de mayor longitud, que tendrían ya otra funcionalidad.

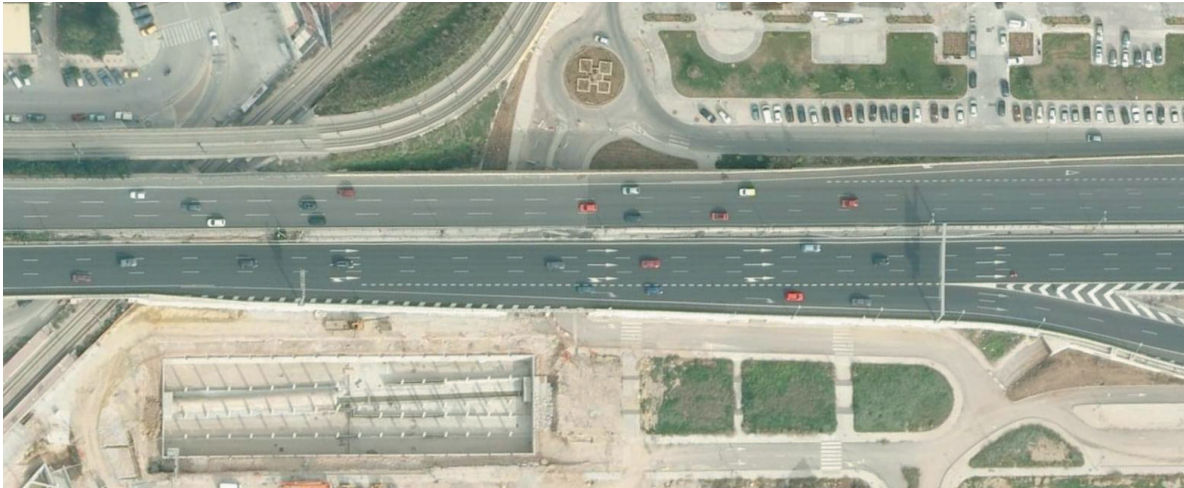
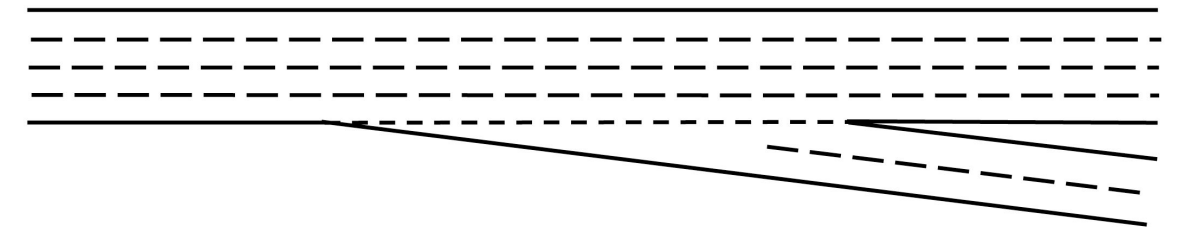


Figura 8. Ramal de salida doble con carriles de salida nuevos.

ciente antelación, de forma que constituya una pérdida de carril.

– El diseño de salidas con dos carriles, que tiene la ventaja añadida de aumentar la capacidad del ramal de salida, aunque nunca en proporción directa al aumento del número de carriles.

Para definir la longitud del carril adicional podemos seguir aplicando el modelo de regresión de la divergencia, e incluso extrapolarlo. En una autopista o autovía de dos carriles por sentido, y suponiendo unas condiciones correspondientes a un nivel de servicio C⁽⁷⁾ de menor densidad (12 (veh.lig./km)/carril), un sencillo cálculo nos proporciona una longitud de carril estimada entre 800 y 900 m, que conceptualmente no debería tener consideración de carril de cambio de velocidad (puesto que se superan los 450 m, límite de la zona de influencia del modelo de divergencia⁽⁸⁾), sino la de un carril adicional con la función de reducir en el tronco la perturbación que provoca la salida.

Es importante tener presente que con este cálculo se sigue aprovechando la capacidad del tronco, pero con una densidad de vehículos menor en la conexión; de forma que se mejora el funcionamiento de ésta.

En cuanto a las salidas de dos carriles, su diseño morfológico se puede obtener por la superposición y desplazamiento de dos carriles de cambio de velocidad paralelos, similar al tipo 4 presentado en la figura 5. Con las mismas condiciones anteriores, y basándonos en el diseño propuesto en el HCM2000, se puede estimar que sería necesario un primer carril paralelo auxiliar de unos 585 m; y a la mitad de su longitud debería crearse el segundo carril paralelo.

Existen otras alternativas para establecer la transición hacia un ramal de salida de dos carriles:

- Disposición en cuña con dos carriles de salida nuevos (figura 8). Esta alternativa presenta limitaciones funcionales y de seguridad. Se aprovecha muy poco el incremento de capacidad del segundo carril, ya que se necesitaría acceder a él desde el segundo carril del tronco. Estas maniobras entrarían en conflicto con el cambio de carril de algunos de los vehículos que habían entrado al ramal por el carril de la derecha.

- Disposición con un carril de salida perdido y un carril bifido (figura 9 en la página siguiente). El carril de salida derecho puede ser perdido o puede ser un carril auxiliar que em-

piece con suficiente antelación a la transición, prologándose en el carril derecho del ramal. El carril básico derecho del tronco se puede utilizar para el movimiento de continuidad, y también para salir por el carril izquierdo del ramal. Esta solución puede provocar incertidumbres de canalización y orientación, con la aparición de maniobras de cambio de carril apresuradas en la proximidad de la nariz. Se precisa una señalización vertical apropiada, y sería conveniente una señalización horizontal específica, estableciendo una marca vial continua en los dos bordes del carril bifido hasta que se rebasara la nariz.

- Disposición con carriles de salida segregados (véase figura 10 más adelante). Es una solución parecida a la anterior; pero, para paliar el problema descrito, se inserta una isleta separadora entre los dos carriles de salida, por lo que en realidad aparecen dos oportunidades consecutivas

⁽⁷⁾ Podría adoptarse otro nivel de servicio mejor, pero simplemente supondría emplear longitudes menores para el carril adicional. Podemos elegir la densidad que asumiremos para la conexión

⁽⁸⁾ Aunque existe normativa que los propios carriles de cambio de velocidad los considera adicionales.

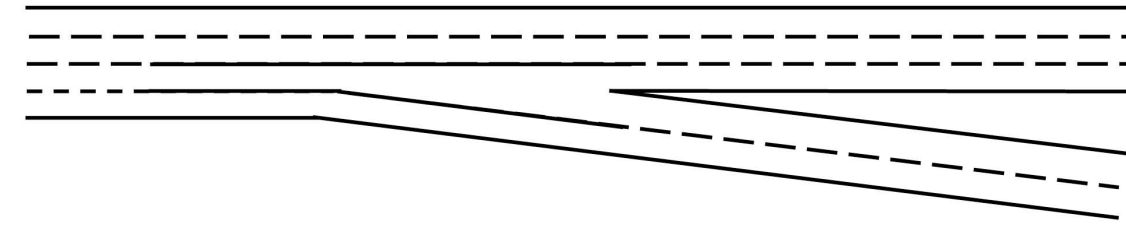
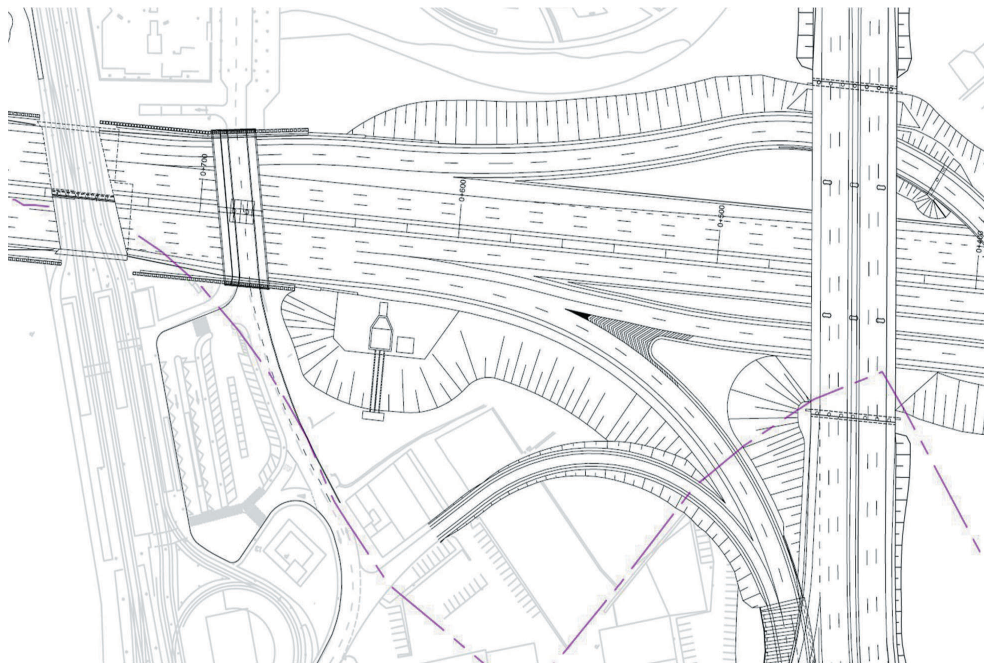


Figura 9. Ramal de salida doble con carriles de salida bífido y perdido.

de salida. Se ha desarrollado en el Reino Unido y empleado en algunas localizaciones desde hace unos diez años ("cola de tigre"). Sus resultados parecen prometedores, tanto desde el punto de vista funcional, como desde la seguridad lograda (Wall y Hounsell, 2005).

- Disposición con carril de salida perdido y carril de salida nuevo (figura 11). Se trata de la solución caracterizada antes como tipo 3 (figura 4); es decir, que se corresponde con la solución básica presentada en la parte inferior de la figura 7; pero en la que el carril derecho de la calzada principal se convierte en el carril izquierdo del ramal de salida.



7. Conclusiones y recomendaciones

Las crecientes necesidades de nuestro sistema viario requieren ampliar el concepto de salida que venimos utilizando. Cada vez es más frecuente la aparición de ineficacias para resolver demandas de tráfico elevadas en mu-

chos carriles de cambio de velocidad del entorno de grandes ciudades.

Es necesario madurar soluciones que permitan resolver satisfactoriamente las salidas de vías de altas prestaciones, con condiciones de funcionamiento alejadas del flujo libre en una proporción importante del tiempo de servicio.

En este artículo se proponen diversas posibilidades para el diseño de salidas de altas prestaciones. Pa-

ra ramales de un solo carril se propone la implantación de un carril adicional previo a la salida, en una longitud suficiente para que el flujo de vehículos alcance la estabilidad y se reduzca la densidad. También se propone el empleo de ramales de salida con dos carriles, mediante la superposición de diversos tipos de carriles, con funcionalidades diferentes: carriles de cambio de velocidad paralelos; carriles nuevos en cuña; ca-

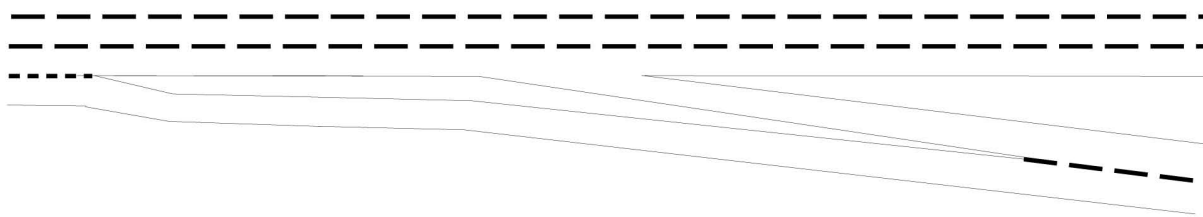


Figura 10. Ramal de salida doble con carriles de salida segregados .

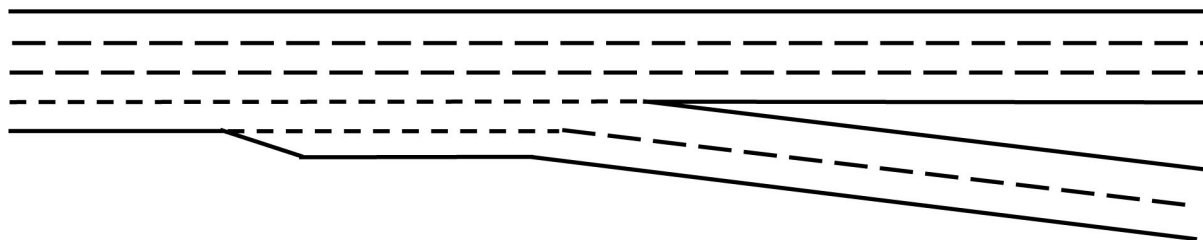


Figura 11. Ramal de salida doble con carriles de salida perdido y nuevo.

rril bífido adosado al carril perdido en el ramal; y carril bífido, pero segregado del carril perdido.

Debemos ir desterrando la idea de que resolver una salida o entrada de una vía con cierto nivel de demanda de tráfico es un simple problema de deceleración/aceleración del vehículo. Además, hay que considerar de forma explícita la seguridad inherente a las diferentes configuraciones.

Teniendo en cuenta las aportaciones presentadas, se llega a la necesidad de establecer una solución de compromiso entre el incremento de la funcionalidad de la salida y la optimización de su seguridad vial, ya que se ha demostrado que estableciendo carriles de deceleración más largos o, lo que es lo mismo, carriles auxiliares funcionales o carriles perdidos en la salida, se incrementa la siniestralidad asociada a una mala percepción del diseño.

Los razonamientos seguidos en el artículo se han basado en la estimación de la densidad en una divergencia siguiendo los criterios y la metodología del HCM2000. En esta fase de maduración del diseño de las salidas de altas prestaciones, sería muy necesario disponer de una relación semejante para nuestras condiciones operativas.

En todo el análisis que se ha realizado de las salidas de altas prestaciones no se ha considerado la in-

fluencia de las características del ramal de salida, tanto de su diseño geométrico, como de la posible existencia de un elemento de control de tráfico a la finalización del mismo, v.g. ceda el paso o semáforo.

Otra parte importante del diseño de las salidas de altas prestaciones está relacionada con la forma más adecuada de señalizarlas, tanto horizontal, como verticalmente. Las normativas actuales de señalización no contemplan específicamente este tipo de salidas, por lo que será necesario su estudio para llegar a proponer las determinaciones correspondientes que garanticen una adecuada funcionalidad y seguridad a los usuarios.

Referencias bibliográficas

- American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO (2004). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*, Washington, D.C.
- Canale, S., Torrisi, S., Nicosia, F. y Leonardi, S. (1998). Adeguamento delle corsie di uscita autostradali mediante informazioni ricavate dai rilievi sperimentali. *Atti del Convegno SIIV* (Società Italiana Infrastrutture Viarie) Milán, 19/20 octubre.
- Colona, P. y Delcarmine, P. (1997). Indicazioni progettuali, desunte

da un'indagine sperimentale, per le corsie di decelerazione in curva. *Atti del Convegno SIIV* (Società Italiana Infrastrutture Viarie). Roma, 20/21 febbraio, pp. 205-227.

- Chen, H. et al. (2008). Impacts of exit ramp type on the safety performance of freeway diverge areas. *87th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington, D.C.

- Dirección General de Carreteras (1999). *Instrucción de Carreteras*, Norma 3.1-IC. Ministerio de Fomento, Madrid.

- García, A. y Romero, M. A. (2006). Influencia de la longitud del carril de deceleración en la funcionalidad y seguridad. *Carreteras*, nº 145, pag. 6-16, Asociación Española de la Carretera.

- Polus, A., Livneh, M. y Factor, J. (1985). Vehicle behavior on deceleration lanes. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 111, nº. 6. Noviembre, pp 595-606.

- Rocci, S. (1998). Un modelo de las máximas prestaciones de un vehículo. *Rutas*, nº 66, mayo/junio, Asociación Técnica de Carreteras.

- Transportation Research Board (2000). *Highway Capacity Manual*, Washington, D.C.

- Wall, G.T. y Hounsell, N.B. (2005). Microscopic modelling of motorway diverges. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 5, nº 3, pp. 139-158. ■